第46卷 第3期
2023年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 3
Mar. 2023

空气动力学粗糙度研究进展

李鑫玉， 王静璞， 王周龙

（鲁东大学资源与环境工程学院，山东 烟台 264025）

摘 要：空气动力学粗糙度是衡量地球表面与大气之间动量和能量交换的重要参数，对于研究各种地表过程和气候变化至关重要。遥感技术作为远距离监测手段，研究空气动力学粗糙度时其优势在于高时效、高经济效益，能实现区域或大空间尺度的动态监测，因此利用遥感技术估算空气动力学粗糙度成为热点问题。通过系统阐述近年来国内外空气动力粗糙度研究进展，重点介绍了利用遥感技术估算植被下垫面空气动力学粗糙度的方法，对各种估算方法的优势和不足进行了总结，分析了气象因素和地表粗糙元形态特征因素对空气动力学粗糙度的影响，进而对遥感技术在该领域的应用做出展望，旨在为空气动力学粗糙度遥感监测的研究提供思路。

关 键 词：空气动力学粗糙度；遥感；研究现状；影响因素

文章编号：1000－6060(2023)03－0407－11(0407～0417)

空气动力学粗糙度指近地表大气在中性稳定的条件下，风速廓线上风速为零的几何高度。由于地表粗糙元素的存在，计算对数风速剖面的有效参考高度向上移动至某一高程，这个高度被定义为零平面位移高度，它反映了粗糙元素对地表动量吸收的特征。空气动力学粗糙度表征地表不同下垫面与近地表气流的相互作用和物质、能量交换[1-4]，对土壤风蚀有直接影响，是研究干旱和半干旱地区水土流失的关键参数[3-5]，也广泛应用于区域地表通量反演、化学输运模型和生态系统模型中[6-10]。因此，空气动力学粗糙度的参数化是值得深入研究的课题。

目前，随着国内外学者对地表空气动力学领域的深入开展，估算区域尺度上非均匀地表的空气动力学粗糙度成为热点问题。基于实测数据的估算方法是验证遥感方法准确性的前提[8,11-17]，主要有冠层高度固定比例法、风洞试验法和野外实验法。后来发展的查表法能实现更大范围空气动力学粗糙度的估算，该方法基于土地利用类型，将同一性质下垫面的空气动力学粗糙度设为定值，忽略了特定土地利用类型固有的时空变化[18-19]。遥感数据覆盖范围大、观测周期短且有多种途径获得，为研究大空间尺度的空气动力学粗糙度的动态变化开辟道路。近20 a里，国内外学者对遥感技术应用于空气动力学粗糙度的参数化进行了多方面研究[5,19-25]。本文概述了利用遥感技术估算植被下垫面空气动力学粗糙度的方法。

1 基于实测数据的方法

1.1 基于冠层高度固定比例法

用植被平均高度估算空气动力学粗糙度是最常用的方法之一，对于植被下垫面，植被高度是地表粗糙状况及气流拖曳力大小的影响因子[11,13,26]。在相关研究中，按照简单的经验法则将植被高度与空气动力学粗糙度联系起来近似计算[20,26-29]。例如，Yang等[28]对具有复杂几何和空间结构的北方森林冠层的空气动力学粗糙度进行参数化，使用植被高度(H)来简化表示空气动力学粗糙度(z_0)，计算公式

收稿日期：2022-07-22； **修订日期：**2022-09-02
基金项目：国家自然科学基金面上项目(41871003)；烟台市科技创新发展计划项目(2022MSGY062)资助
作者简介：李鑫玉(1998-)，女，硕士研究生，主要从事草原植被遥感监测研究. E-mail: lxywork1@163.com
通讯作者：王静璞(1987-)，女，博士，副教授，主要从事植被遥感监测、沙漠化过程研究. E-mail: wangjp@ldu.edu.cn

如下：

$$z_0 = 0.125H \tag{1}$$

Masseroni 等[27]对稻田在整个农业季节的零平面位移高度和空气动力学粗糙度进行测量发现，在整个生长季，2个参数与H有良好的相关性(R^2>0.9)；Santos 等[26]基于卫星的能量平衡模型(METRIC)研究橄榄园的蒸散量，模型中空气动力学粗糙度(z_0)的固定函数为：

$$z_0 = 0.068H \tag{2}$$

Van der Graaf 等[6]在用于研究欧洲西北部活性氮的地表-大气交换模型中，空气动力学粗糙度作为模型输入参数，其大小取决于植被高度。

1.2 野外实验法

由于观测条件和实验观测仪器的差异，在野外实测气象数据时主要发展了风速廓线法、涡动协方差(EC)法和大孔径闪烁仪(LAS)法。利用野外实测数据的推算方法有最小二乘拟合迭代法、牛顿迭代法、温度方差法(TVM)和Martano法[30-31]。

1.2.1 风速廓线法 气象站中常用到的监测设备主要有风速传感器、风向传感器、温湿度传感器等，传感器将对应气象要素值存储在数据采集器中。利用气象观测资料计算空气动力学粗糙度时，采用Monin-Obukhov相似度理论，基于不同高度同一时刻测量的风速剖面和温度剖面数据，根据微气象学原理及其一系列计算公式，通过最小二乘法拟合迭代得到空气动力学粗糙度的最优解[11,22,32-33]。其中，对风速廓线的气象剖面时间序列数据进行处理，在中性稳定大气条件下，计算公式如下：

$$u = \frac{u_*}{k}\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \tag{3}$$

式中：u为风速($m \cdot s^{-1}$)；u_*为摩阻速度($m \cdot s^{-1}$)；k为Von Karman常数(取值0.4)；z_0为空气动力学粗糙度(m)；d为零平面位移(m)；z为参考高度(m)。对测定结果用最小二乘法进行回归分析，确定最佳拟合关系式来求出z_0。

薛晶等[11]采用风速廓线仪采集不同高度草原灌木带的风速廓线数据，采用最小二乘法对数据进行计算得到空气动力学粗糙度；Yu等[34]利用干旱和半湿润气候条件下自动气象站的风速资料，采用迭代法计算2个地区时间序列上的空气动力学粗糙度。

1.2.2 涡动协方差(EC)法和大孔径闪烁仪(LAS)法 EC和LAS法采用Monin-Obukhov相似度理论，从地表通量的角度出发，得到计算空气动力学粗糙度的变量，结合当地气象数据，进而求得空气动力学粗糙度的方法[9,11,13,15-16]。2种方法区别在于：一是LAS与EC相比，由于光路从数百米到数千米不等，能够测量大面积的湍流通量，更适合计算大空间尺度上的非均匀下垫面空气动力学粗糙度[3]；二是在计算通量时，EC数据包括风速、大气稳定性、摩擦速度等计算空气动力学粗糙度的变量，LAS数据包括大气稳定性和摩擦速度这2个变量，而风速数据要根据气象站观测来获得。

EC观测系统是一种微气象学的测量方法，采用EC原理，利用快速响应的传感器来测量大气与下垫面间的物质交换和能量交换，它是目前地表通量观测精度最高且最常用的仪器。EC通量观测站可以观测到瞬时风向、瞬时风速、温度、水汽感热通量和痕量气体浓度数据，是一种直接测算通量的标准方法。LAS由发射仪和接收仪2部分组成，接收仪接收到光程上大气波动影响的发射波束，并用折射指数的结构参数来表达大气的湍流强度，进而推算湍流通量。当光束在扰动大气中沿直线传播时，受到扰动引起传播光束强度的波动，通过接收到光程上大气波动光束，并用折射指数结构参数(C_n^2)来反映大气的湍流强度[33,35]。

根据Monin-Obukhov相似度理论，Sun等[3]利用EC数据和LAS数据计算了青藏高原北部的空气动力学粗糙度，空气动力学粗糙度的计算公式为：

$$z_0 = (z-d) \times \exp\left[\frac{-k \times u(z)}{u_*} + \Psi_m\left(\frac{z-d}{L}\right)\right] \tag{4}$$

式中：z_0为空气动力学粗糙度(m)；$u(z)$为EC或LAS测量高度z处的水平风速($m \cdot s^{-1}$)；d为零平面位移(m)，设置为植被高度的2/3；L为Monin-Obokhov长度(m)；u_*为摩阻速度($m \cdot s^{-1}$)；Ψ_m为大气稳定性修正函数；k为Von Karman常数，取值0.4。

鞠英芹等[13]利用涡动相关仪和自动气象观测资料估算农田、草地下垫面的空气动力学粗糙度时空变化特征，并将估算值与其他参数化方案进行比较；Liu等[19]利用EC法测量值计算的空气动力学粗糙度来检验经验模型估算的全球尺度的空气动力学粗糙度；Zhang等[33]利用三维超声波风速仪获取中国北方风蚀区5个站点的近表面风速，计算草地、农田、流动沙地和戈壁4种地表类型的空气动力学粗糙度，发现草地的地表粗糙度最大，其次是农田、

沙地和戈壁。

1.3 风洞试验法

风洞试验通过在实验室模拟自然风对不同形状及植被覆盖密度情况下土壤的风蚀作用，得到不同高度的风速，再由中性稳定大气条件下的计算公式[式(3)]得到空气动力学粗糙度[4,12,14,17,36-39]。风洞分为过渡段、整流段、收缩段和试验段，同时配套有风速测试控制系统，其中试验段模拟自然风，能产生自由旋涡气流和稳定流动的气流场[14,36]。风洞试验设置模型作物的高度、疏透度、株行距等重要参数，模拟地表植被不同粗糙程度下对风的阻挡作用，研究空气动力学粗糙度时与冠层高度固定比例法相比更为准确。

植被作为主要的风蚀因子之一，近年来国内外学者开展了风洞模拟实验用于研究植被表面粗糙度对土壤风蚀作用的影响。张春来等[17]利用风洞试验研究了耕作土壤表面的空气动力学粗糙度；莎日娜等[12]基于风洞模拟试验，研究沙漠地区油沙豆种植示范区在不同留茬模式下近地表风速变化及防风效能，采用风速廓线法计算空气动力学粗糙度。

移动式风蚀风洞的出现解决了传统风洞试验法取样时对原地表土造成的扰动的问题。刘艳萍等[38]利用移动式风蚀风洞研究草原区植被对土壤风蚀的影响；赵永来等[14]利用移动式风蚀风洞分析了燕麦残茬下垫面的空气动力学粗糙度的变化。

1.4 方法评述

冠层高度固定比例法采用单一变量的简化经验关系式，与植被平均高度相关，但相关研究表明，气象因子和地形起伏等对植被下垫面空气动力学粗糙度均存在影响[20,32,40-41]，且该方法一般适用于农业地区的均匀植被地表，而区域或大空间尺度的植被具有空间异质性，因此在研究空气动力学粗糙度时存在一定局限性。野外实验法对数据质量要求严格，在野外设置不同站点获取气象数据，一般用来作为地面验证的真值，但自然条件和仪器系统的微小影响会使其计算结果产生较大误差，且结果只能代表一定范围源区，不能推广到大空间尺度的应用。风洞试验法考虑了气流与地表粗糙元对空气动力学粗糙度的综合作用，模拟理想状态下不同风速和地表覆盖状况下的风蚀作用，进而研究空气动力学粗糙度，但不足之处在于风洞试验是采取流场相似性原则，有别于地表真实状况，研究发现风洞实验与现场实测的风沙结果相似性较低[4]，且所需仪器设备成本较高且耗时耗力[18]。

2 遥感方法

遥感影像覆盖范围大、观测周期短且有多种途径获得，因此在研究大空间尺度的空气动力学粗糙度时具备突出的科学性和技术优点。遥感方法通过反演地表参数或者大气参数输入到模型计算空气动力学粗糙度[18,30]。

2.1 植被指数模型法

空气动力学粗糙度与下垫面粗糙元的地表特征有关，植被与水体、裸地等下垫面相比，形态特征复杂、动态变化明显，因此在遥感中引入植被指数估算空气动力学粗糙度是非常有必要的。植被指数是根据植被的光谱特性，基于多种波段组合，对地表植被状况的度量。基于光学卫星数据的反演方法一般是建立植被指数与空气动力学粗糙度、零平面位移高度的关系模型，再通过经验模型转换为空气动力学粗糙度。常用的植被指数有归一化植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI)、锋面面积指数(FAI)等。

2.1.1 归一化植被指数(NDVI) NDVI是植物生长状态以及植被空间分布密度的最佳指示因子。NDVI是根据近红外波段反射率(ρ_{nir})和红光波段反射率(ρ_{red})计算出来的，计算公式如下：

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \tag{5}$$

利用遥感技术研究植被下垫面的空气动力学粗糙度时，NDVI的应用较为广泛[5,7,21-22,34,42-43]。贾立等[7]由Landsat TM资料计算NDVI，将其与黑河试验点的湍流通量观测所估算的空气动力学粗糙度建立经验关系式；Gupta等[21]使用NOAA-AVHRR数据计算NDVI，结合地表过程参数建立印度半干旱地区空气动力学粗糙度与NDVI之间的关系式；Xing等[22]对比不同植被指数与空气动力学粗糙度的关系，发现NDVI是草地空气动力学粗糙度的敏感指标；Abbas等[5]得到了描述NDVI与空气动力学粗糙度关系的最佳最终数学模型，用于绘制整个伊拉克地区的粗糙度长度图[3]。

2.1.2 叶面积指数(LAI) LAI量化了陆地植被的绿叶面积，是植被冠层结构和功能的基本属性[20,44]。

大量研究表明,空气动力学粗糙度与植被冠层结构参数有关,因此在反演空气动力学粗糙度时,LAI在一定程度上比NDVI具有更强的相关性,零平面位移高度和空气动力学粗糙度是LAI的强函数[3,13,15,19,45-48]。张杰等[15]根据空气动力学粗糙度与风速、植被密度和LAI的关系,采用遥感方法反演LAI和风速,估算稀疏植被区空气动力学粗糙度;Cho等[47]用LAI与冠层高度的比值表征冠层结构的复杂性,来检验空气动力学粗糙度与反照率的关系;Alekseychik等[46]将空气动力学粗糙度与LAI表示为线性函数关系;Sun等[3]利用前人开发的经验模型和LAI数据,研究青藏高原北部小空间尺度上空气动力学粗糙度的空间分布;Liu等[19]利用湍流传输模型,根据LAI和植物功能类型有关的冠层形态特征,计算了1982—2017年的全球零平面位移高度和空气动力学粗糙度这2个空气动力学参数。

2.1.3 锋面面积指数(FAI) FAI表示为粗糙度元素的锋面积与单位地面面积的比值,后来用冠层面积指数(Λ)或单位地面面积中所有冠层元素的总单面面积来替代FAI,Λ包括所有吸收动量的冠层元素。Jasinski等[49]建立了自然植物或随机分布植物的FAI和Λ的参数化方法,并将其应用于利用卫星图像估计局部空气动力学粗糙度;Schaudt等[45]采用Raupach提出的空气动力学粗糙度与FAI的函数关系式,利用卫星数据反演空气动力学粗糙度,当FAI=0.152时,表示为:

$$\frac{z_0}{h}=5.86\exp\left(-10.9\lambda^{1.12}\right)\lambda^{1.33}+0.00086 \tag{6}$$

当FAI>0.152时,表示为:

$$\frac{z_0}{h}=\frac{0.0537}{h}\left[1.0-\exp\left(-10.9\lambda^{1.12}\right)\right]+0.00368 \tag{7}$$

式中:z_0为空气动力学粗糙度(m);h为植被高度(m);λ为单位面积的锋面面积指数。

杨阿强等[48]采用前人改进的形态学模型,根据Λ与LAI之间的关系,采用遥感数据源对中国东部的空气动力学粗糙度进行估算,并研究其时空变化,其中Λ定义为单位面积上植被对风的阻挡面积,计算公式如下:

$$\Lambda=\mathrm{LAI}+\mathrm{Lg}+\mathrm{Ls} \tag{8}$$

式中:Lg为植株地上茎面积指数;Ls为枯萎叶面积指数。

利用LAI和经验参数计算Lg和Ls二者的和,L_s^n为二者的和,其中n为第n个月,α为不同植被类型的固定参数,$1-\alpha$为每月枯叶凋落比率,计算公式如下:

$$L_s^n=\mathrm{Lg}+\mathrm{Ls}=\max\left\{\left[\alpha L_s^{n-1}+\max\left(\mathrm{LAI}^{n-1}-\mathrm{LAI}^n,0\right)\right],\mathrm{Ls}_{\min}\right\} \tag{9}$$

2.1.4 双向反射率分布函数指数 从单一观测角度计算的植被指数在反演与空气动力学粗糙度密切相关的三维植被结构方面能力有限,一个潜在的解决方案是引入多角度光学遥感[22,34,50],标准MODIS BRDF/反照率(MCD43)实现了半经验BRDF模型数据产品。Xing等[22]将草地下垫面的BRDF_R指数与空气动力学粗糙度的关系表示为指数幂函数的形式(表1),其中Ross-Li模型采用3个核的线性加权和形式,将二向反射率表示为3项的总和:

$$\rho(\theta_s,\theta_v,\varphi)=k_0+k_1F_1(\theta_s,\theta_v,\varphi)+k_2F_2(\theta_s,\theta_v,\varphi) \tag{10}$$

式中:$\rho(\theta_s,\theta_v,\varphi)$为二向反射率;$\theta_s$为太阳天顶角;$\theta_v$为观测天顶角;$\varphi$为太阳和观测点的相对方位角;$F_1$和$F_2$分别为体散射核和几何光学散射核,均是$\theta_s$、$\theta_v$、$\varphi$的函数;$k_0$、$k_1$和$k_2$为各个核的系数,分别表示各向同性散射、体散射、几何光学散射所占的权重。基于式(10),反映地表几何粗糙度的近红外双向反射率分布函数指数(BRDF_R),计算公式如下:

$$\mathrm{BRDF_R}=k_2/k_0 \tag{11}$$

通过遥感数据提取植被指数进行空气动力学粗糙度的研究不断更新,模型形式多样,近年来研究方法归纳总结见表1。

2.2 激光雷达方法

空气动力学粗糙度受地表粗糙度元素的高度、几何形状、密度等影响,这些元素包括植被以及微观和宏观的地形特征[23-25,32,40-41,51-53]。激光雷达在描述地表和粗糙元特征方面显示出巨大潜力[54-55],在研究空气动力学粗糙度时比光学卫星具有一定技术优势,按搭载平台来看主要有机载激光雷达和卫星雷达。机载激光雷达是一种主动测量方式,利用激光进行探测和测量,通过点云数据获得陆地表面和植被的三维结构,为估算空气动力学粗糙度提供了新方法。Greeley等[52]利用校准后的雷达后向散射系数与空气动力学粗糙度建立关系,发现4种类型下垫面均具有很好的相关性,证明可以利用雷达数据评估空气动力学粗糙度。

Colin等[25]通过激光雷达测量的点云数据获得黑河流域的数字高程模型(DEM)和数字地表模型

表1 常用的空气动力学粗糙度参数化方法

Tab. 1 Common parameterization methods of aerodynamic roughness

指数	植被类型	表达式	参考文献
NDVI	农田	z_0=exp(−5.5+5.8NDVI)	Gupta 等[21]
	林地、草地	$z_0=0.0206e^{7.6978NDVI}$	Abbas 等[5]
	草地	$z_0=0.0203NDVI^{0.9547}$	Xing 等[22]
	玉米、小麦	$z_0(x, y)$=exp[7.13+9.33NDVI(x, y)]	贾立等[7]
	春玉米	z_0=0.2255NDVI+0.0087	Yu 等[34]
	冬小麦	z_0=0.2476NDVI+0.0615	
	夏玉米	z_0=0.2858NDVI+0.1017	
	紫花苜蓿	$z_0=e^{-5.5+5.3NDVI}$	Van der Graaf 等[6]
LA	林地	$z_0=0.3299Lp^{1.5}+2.1713$	Schaudt 等[45]
	莎草	$LAI_s=6.51z_0-0.17$	Alekseychik 等[46]
	玉米	$z_0=z_0'+0.3h(C_d\times LAI)^{1/2}$	Lu 等[40]
	短高山草	z_0=exp[−2.225−0.938/(LAI−0.205)]	Sun 等[3]
		z_0=exp[2.613−0.173/(LAI−0.287)]	
BRDF_R	草地	z_0=0.0013BRDF_R−0.65	Xing 等[22]
FAI	宽叶林、针叶林	$z_0/h=0.0537\times FAI^{0.51}[1.0-\exp(-10.9FAI^{0.874})]+0.00368$	Schaudt 等[45]
HDVI	春玉米	z_0=0.2236HDVI−0.0279	Yu 等[34]
	冬小麦	z_0=0.2695HDVI+0.0688	
	夏玉米	z_0=0.2113HDVI+0.0391	
NDVI，u	稀疏柽柳	$z_0=0.5307u^{NDVI}-0.3952$	Xing 等[50]
CI	草地	z_0=0.0078CI−0.493	Xing 等[22]
NDVI，α	棉花	z_0=exp[0.26(NDVI/α)−2.21]	Allen 等[10]

注：z_0为空气动力学粗糙度；NDVI为归一化植被指数；Lp为植物平均叶面积指数；LAI为叶面积指数；FAI为单位面积锋面面积指数；LAI_s为莎草单一种类的叶面积指数；C_d为平均阻力系数；z_0'为土壤表面粗糙度长度；h为植被高度；BRDF_R为近红外双向反射率分布函数指数；u为风速；HDVI为归一化差异热点暗点指数；CI为BRDF_R和NDVI结合的综合指数；α为反照率。

(DSM)，将DEM、DSM应用到几何模型(Macdonald模型、R92形态学模型)和流体动力学模型(CFD)，发现CFD模型对不同下垫面的适用性更强，可以更精细地观察气流与粗糙元素之间的相互作用；Li等[24]利用激光雷达和成像光谱技术获取植物结构信息，估计以灌木为主的旱地研究区域的空气动力学粗糙度，对比了2种参数化方法估计空气动力学粗糙度的敏感性；Trepekli等[56]利用无人机载激光雷达获取植被表面的三维结构数据，评估了3种形态学模型估算丹麦农田和周围常绿树木空气动力学粗糙度的准确性，其中Raupach模型的估算结果为最佳，该方法基于植被几何形状和风条件，表达式如下：

$$z_0 = h(1 - d/h) \times \exp(-ku/u_* + \psi_h) \quad (12)$$

$$d/h = 1 + \left\{\left(\exp\left[-(2c_{d1}FAI)^{0.5}\right] - 1\right) / \left((2c_{d1}FAI)^{0.5}\right)\right\} \quad (13)$$

$$u_*/u = \min\left[\left(c_s + c_r FAI\right)^{0.5}, \max(u_*/u)\right] \quad (14)$$

式中：z_0为空气动力学粗糙度(m)；h为平均粗糙度元素高度(m)；d为零平面位移(m)；k为Von Karman常数(取值0.4)；u为风速(m·s^{-1})；u_*为摩阻速度(m·s^{-1})；ψ_h为粗糙度子层影响函数；c_{d1}是自由参数(取值7.5)；FAI由激光雷达获取的横截面线上的正高度变化(Δy)除以该截面长度的距离(Δx)计算；c_s为单个粗糙度元素的阻力系数；c_r为基底表面在h处的阻力系数。Paul-Limoges等[51]利用机载激光雷达数据来估算冷杉林采伐前后的空气动力学粗糙度，表明了在复杂情况下使用激光雷达数据估计空气动力学粗糙度的潜力。

2.3 多源数据结合方法

不同研究区影响空气动力学粗糙度的主要因素有差异，不同遥感数据源各具其特征与优势，结合遥感多源数据建立空气动力学模型显现其优势所在[10,22,34,50,57]。Allen等[10]提出使用反照率(α)有助于区分具有相似的NDVI但却高度不同的植被类

型，将NDVI与α相结合，并建立与空气动力学粗糙度的关系式（表1）；吴炳方等[57]综合考虑了植被信息、地形因子、非植被覆盖表面的几何粗糙度因素来估算空气动力学粗糙度，其中植被指数NDVI的函数表达为：

$$z_{0m}^{v} = 0.01 + \left(0.5\frac{NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right)^{2.5} \quad (15)$$

式中：z_{0m}^{v} 为植被区的粗糙度（m）；$NDVI_{max}$ 为区域中归一化植被指数的最大值；$NDVI_{min}$ 为最小值。

在地形起伏的情况下，考虑DEM的坡度信息（slope）对粗糙度的影响：

$$z_{0m}^{T} = z_{0m}^{v}\left(1 + \frac{slope - a}{b}\right) \quad (16)$$

式中：z_{0m}^{T} 为坡度因子的粗糙度（m）；slope为从数字地形数据中获取的坡度文件；a与b为经验系数。

从雷达影像中反演得到的表面几何粗糙度表示非植被覆盖区域的地表粗糙度：

$$\lg\left(z_{0m}^{r}\right) = -1.221 + 0.0906\left(\sigma_{0}\right) \quad (17)$$

式中：z_{0m}^{r} 为非植被覆盖区域的地表粗糙度（m）；σ_0 为从Radarsat卫星影像中获取的后向散射系数。区域综合有效粗糙度是以上植被、地形和非植被覆盖表面的几何粗糙度3种因素的加权函数。

Xing等[22]发现BRDF_R和NDVI都是草地空气动力学粗糙度的敏感指标，创新性地将二者结合开发了组合指数（CI），且与生长季草地空气动力学粗糙度呈幂函数关系（表1），其中，

$$CI = \frac{sqrt(BRDF_R)}{NDVI^{1.5}} \quad (18)$$

Xing等[50]又提出了NDVI和实测风速相结合计算空气动力学粗糙度的方案（表1），以评估黑河流域干旱地区绿洲的空气动力学粗糙度，该方案表现出良好的适用性，其中，

$$WN = WS^{NDVI} \quad (19)$$

式中：WN为风速与NDVI的综合指数；WS为NDVI数据日期5 m处的平均风速（$m \cdot s^{-1}$）。

2.4 方法评述

利用遥感技术估算空气动力学粗糙度，在区域或大空间尺度上具有明显优势，成本低且不会对环境产生破坏。植被指数模型将空气动力学粗糙度与植被特性相联系，但对于非均匀植被下垫面，不同遥感产品得到的同一植被指数可能会有偏差，且植被指数在非生长季并不适用[19]。激光雷达具有方向性好、分辨率高且抗干扰能力强的技术优势，在获取地表立体信息方面有很大潜力，但需要注意的是，机载激光雷达会受大气状况影响，且获取地表植被结构信息会存在一定的局限性，限制包括低估植被高度和难以获得个别粗糙度元素冠层信息[24]。多源遥感协同方法综合考虑空气动力学粗糙度的影响因子，通过异质观测数据相结合克服单一数据源存在的缺陷，实现互补互利，来获得区域最佳估算模型，但目前也存在多源数据在各因子耦合和时空分辨率匹配方面的问题。

3 空气动力学粗糙度影响因子

空气动力学粗糙度的大小主要取决于地表粗糙度要素的几何特征和分布密度[32,41,49]，同时也受大气因子（风速、风向、大气稳定度等）影响。在风蚀模型中，植被的物理结构通过对气流施加阻力与风相互作用，因此空气动力学粗糙度是各种因子综合作用的动力学参数。

3.1 气象因素

3.1.1 风速 一定地表条件下空气动力学粗糙度并不是一个常数，其值随着风速变化而有明显变化[14-15,32,58]。对于植被覆盖下垫面，随着风速的增加，风在一定程度上改变地表植被的几何形状，在风的作用下向同一方向倾斜，空气动力学粗糙度随风速的增加而减小达到一定临界点后稳定[15,32]。

张雅静等[59]基于实测数据和理论模拟计算，发现不同植被密度条件下，空气动力学粗糙度均与风速呈指数关系；Yu等[32]在研究黑河流域不同时间尺度下空气动力学粗糙度的影响因素时发现，风速是草原和森林山区下垫面空气动力学粗糙度的主要影响因子之一，而对于平坦农田是次要因素；Zhang等[33]比较中国北方风蚀区4种地表类型空气动力学粗糙度，发现空气动力学粗糙度值在低风速时变化最大，在较高风速时变化较小。

3.1.2 摩阻风速 摩阻风速是对由于地面摩擦阻力存在而产生风速梯度的衡量，也是气流对床面剪切力的反映，风力越强，地面阻力越大。研究发现，摩阻风速与平均风速存在线性关系[15,59]。赵永来等[14]发现各实验测点的空气动力学粗糙度都随着摩阻风速的增大而增大，而当风速增大到地表植被倒伏时，边界气流层切应力增大从而导致空气动力学粗

糙度和摩阻风速增幅降低甚至变为负值。

3.1.3 风向 风向变化对空气动力学粗糙度的影响取决于地形的不均匀性，对于地形复杂的地区，每个风向呈现的粗糙元素的密度和分布不同[31,32,40,60]。对于均匀、平坦的下垫面来说，随着风向的改变，空气动力学粗糙度变化幅度较平缓，这是由于影响风浪区的周围障碍物较少，不同风向上风浪区内粗糙元差别不大，因此均匀下垫面可以不考虑风向的影响；而对于非均匀下垫面，不同风向造成地表粗糙元对湍流的拖拽力不同，导致不同风向下的空气动力学粗糙度变化，且空气动力学粗糙度随风向而变化的程度也不同，在特定风向范围内，随风向变化幅度较大[13,32,37,41]。因此，空气动力学粗糙度随风向变化是由风浪区地表粗糙元和气流共同作用形成的，很难通过观测获得非均匀下垫面的空气动力学粗糙度。

于名召[18]基于气象站数据和通量观测数据，发现同一季节的空气动力学粗糙度值在不同风向上表现出明显的差异；Yu等[32]基于黑河流域不同地表格局的3个自动气象站的数据，分析了不同季节影响空气动力学粗糙度的主要气象因素，发现在草原和森林山区，风向是主要影响因素，但对于均匀植被下垫面，风向可以忽略不计。

3.1.4 大气稳定性 空气动力学粗糙度与近地表的大气层结有关，大气层结一般用稳定度来度量，不同的大气稳定度影响湍流的产生[18,32,61-62]。以往对于空气动力学粗糙度的研究是基于大气处于中性稳定的条件下，但在通常情况下，这种理想状态难以实现。不同大气稳定条件下的空气动力学粗糙度差异明显，于名召[18]发现相同地表条件下，大气处于稳定条件下的空气动力学粗糙度明显大于不稳定条件，且不稳定大气条件下空气动力学粗糙度的离散程度较小。大气稳定性与昼夜交替紧密相关，白天，受太阳辐射影响，由于植被与大气之间发生湍流交换，大气条件不稳定，空气动力学粗糙度保持低水平；夜间，大气湍流作用减弱，大气处于较为稳定的条件下，空气动力学粗糙度显著增加[32]。

3.2 地表粗糙元形态特征因素

地表粗糙元（如植被及其他障碍物）的结构和空间分布是空气动力学粗糙度的影响因素，植被的形态特征包括植被高度、密度和盖度等，影响地表粗糙状况及气流拖曳力大小[11,32,36,63-65]。研究指出，空气动力学粗糙度与大气层结稳定度有关，但对地表粗糙元变化更敏感[14]。

描述湍流的许多微气象参数与植被冠层结构相关，空气动力学粗糙度与平均植被高度存在函数关系[13,63,66]。植被下垫面的空气动力学粗糙度随植被生长状况出现季节性变化，当地表植被高度逐渐升高时，植株对于气流的拖曳力增大，空气动力学粗糙度变大[13]。Li等[24]利用激光雷达和成像光谱技术估算空气学粗糙度，发现空气动力学粗糙度的准确性很大程度上取决于估计模型和灌木在模型中的高度。

植被密度和盖度反映了植被的分布、茂密程度以及植物进行光合作用面积的大小。植被密度对空气动力学粗糙度有很强的影响，对于相同高度但密度不同的植被，较稀疏的植被的空气动力学粗糙度较低[41]。研究认为扩大植被盖度能提高地表空气动力学粗糙度[15,36,67]，这是由于植被区的流场存在绕流，植株密度对流场的影响较大，比如在夏季，地表植被盖度相对较大，植被株数较多，所以粗糙单元分布密度相对较大，空气动力学粗糙度将随着流场阻力的增大而增大。

LAI对空气动力学粗糙度的影响存在规律性。在植被生长初期，LAI较小，叶片稀疏且柔软，对气流的阻力较小，空气动力学粗糙度较小；随着植被不断生长，空气动力学粗糙度随LAI增大而增大，达到一个峰值后再降低。原因是当植被生长达到一定浓密程度，由于植被叶片过于密集，风不能从作物内部穿过，直接从植被顶部流过，反而降低了对气流的阻力，植被的表面粗糙度降低，使得空气动力学粗糙度值偏低[13,30]。

4 展 望

遥感技术对大尺度地区空气动力学粗糙度参数化奠定了基础，开辟了多种研究方法，目前遥感观测系统在时间、空间和光谱分辨率上正在不断革新升级，如何更好应用到空气动力学粗糙度领域需要综合考虑地表空气动力学特性。由于多角度观测可以观测到植被对太阳光的不均匀散射，多角度遥感数据在描述作物冠层结构方面具有不可比拟的优势。因此，随着遥感技术向多角度观测、高时空分辨率发展，遥感反演的空气动力学粗糙度数据集的准确性得以提高。

遥感方法在空气动力学粗糙度领域显示了其特有的优势,但使用遥感空间分析方法在宏观尺度上估算植被下垫面空气动力学粗糙度时,参数化时会产生不确定性,原因主要在于未充分考虑地表起伏、植被变化及地气能量平衡动态。研究证明,地表起伏会影响地表粗糙元分布和地表通量变化,对地表粗糙度产生影响,因此空气动力学粗糙度的研究应综合考虑气象因素、粗糙元形态学因素以及地形因素,分析空气动力学粗糙度的主要驱动因子,从多维数据中提取有效特征信息。未来需要充分发挥多种数据源合理交叉融合的优势,发展更为精细的长时序空气动力学粗糙度变化的数据集,整合遥感、站点观测与地表湍流模型模式,深入分析空气动力学粗糙度在不同时空尺度的变化。对于复杂下垫面条件下空气动力学粗糙度的计算,应注意实测数据的验证和标定,将遥感反演与地面观测结合,确保模型的准确性。目前,对空气动力学粗糙度的估算和分析研究主要集中在植被下垫面,未来可以对城市等其他下垫面类型的空气动力学粗糙度进行进一步拓展研究。

参考文献(References)

[1] Dong Z B, Liu X P, Wang X M. Aerodynamic roughness of gravel surfaces[J]. Geomorphology, 2002, 722(1-2): 17-31.

[2] Miles E S, Steiner J F, Brun F. Highly variable aerodynamic roughness length (z_0) for a hummocky debris-covered glacier[J]. Journal of Geophysical Research, 2017, 122(16): 8447-8466.

[3] Sun G H, Hu Z Y, Wang J M, et al. Upscaling analysis of aerodynamic roughness length based on in situ data at different spatial scales and remote sensing in north Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research, 2016, 176-177: 231-239.

[4] Liu J Q, Kimura R, Miyawaki M, et al. Effects of plants with different shapes and coverage on the blown-sand flux and roughness length examined by wind tunnel experiments[J]. Catena, 2021, 197: 104976, doi: 10.1016/j.catena.2020.104976.

[5] Abbas M R, Rasib A W B, Abbas T R, et al. Assessment of aerodynamic roughness length using remotely sensed land cover features and MODIS[J]. IOP Conference Series: Earth Environmental Science, 2021, 722(1): 012015, doi: 10.1088/1755-1315/722/1/012015.

[6] Van der Graaf S C, Kranenburg R, Segers A J, et al. Satellite-derived leaf area index and roughness length information for surface-atmosphere exchange modelling: A case study for reactive nitrogen deposition in north-western Europe using LOTOS-EUROS v2.0 [J]. Geoscientific Model Development, 2020, 13(5): 2451-2474.

[7] 贾立, 王介民. 卫星遥感结合地面资料对区域表面动量粗糙度的估算[J]. 大气科学, 1999, 23(5): 632-640. [Jia Li, Wang Jiemin. Estimation of area roughness length for momentum using remote sensing data and measurements in field[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1999, 23(5): 632-640.]

[8] 朱彩英, 张仁华, 王劲峰, 等. 运用SAR图像和TM热红外图像定量反演地表空气动力学粗糙度的二维分布[J]. 中国科学: 地球科学, 2004, 34(4): 385-393. [Zhu Caiying, Zhang Renhua, Wang Jinfeng, et al. Quantitative inversion of two-dimensional distribution of surface aerodynamic roughness using SAR images and TM thermal infrared images[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2004, 34(4): 385-393.]

[9] 冯健武, 刘辉志, 王雷, 等. 半干旱区不同下垫面地表粗糙度和湍流通量整体输送系数变化特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(1): 24-33. [Feng Jianwu, Liu Huizhi, Wang Lei, et al. Seasonal and inter-annual variation of surface roughness length and bulk transfer coefficients in a semiarid area[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 42(1): 24-33.]

[10] Allen R G, Tasumi M, Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model[J]. Journal of Irrigation Drainage Engineering, 2007, 133: 395-406.

[11] 薛晶, 侯占峰, 刘海洋, 等. 草原灌木带空气动力学粗糙度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6): 253-256. [Xue Jing, Hou Zhanfeng, Liu Haiyang, et al. Study on the aerodynamic roughness of grassland shrub belt[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(6): 253-256.]

[12] 莎日娜, 于明含, 丁国栋, 等. 沙质农田油沙豆保护性耕作优化模式的风洞模拟试验[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(4): 87-94. [Sha Rina, Yu Minghan, Ding Guodong, et al. Shelter efficiency of conservation tillage model in *Cyperus esculentus* in sandy farmland[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(4): 87-94.]

[13] 鞠英芹, 刘寿东, 马德栗, 等. 农田与草地下垫面空气动力学粗糙度的研究[J]. 科技通报, 2016, 32(8): 5-11, 16. [Ju Yingqin, Liu Shoudong, Ma Deli, et al. Study on aerodynamic roughness length on crop and grass underlying surfaces[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(8): 5-11, 16.]

[14] 赵永来, 麻硕士, 陈智, 等. 残茬覆盖地表空气动力学粗糙度变化规律[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 118-122. [Zhao Yonglai, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Variational rule of aerodynamic roughness under crop stubble coverage[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 118-122.]

[15] 张杰, 黄建平, 张强. 稀疏植被区空气动力学粗糙度特征及遥感反演[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 2819-2827. [Zhang Jie, Huang Jianping, Zhang Qiang. Retrieval of aerodynamic roughness length character over sparse vegetation region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(11): 2819-2827.]

[16] Graf A, Boer A V D, Moene A, et al. Intercomparison of methods

for the simultaneous estimation of zero-plane displacement and aerodynamic roughness length from single-level eddy-covariance data[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2014, 151(2): 373-387.

[17] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 耕作土壤表面的空气动力学粗糙度及其对土壤风蚀的影响[J]. 中国沙漠, 2002, 22(5): 473-475. [Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Dong Guangrong, et al. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influence on soil erosion by wind in a wind tunnel[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(5): 473-475.]

[18] 于名召. 空气动力学粗糙度的遥感方法及其在蒸散发计算中的应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. [Yu Mingzhao. Research on remote sensing methods for the aerodynamic roughness length and its application in evapotranspiration calculation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.]

[19] Liu Y, Guo W D, Huang H L, et al. Estimating global aerodynamic parameters in 1982—2017 using remote-sensing data and a turbulent transfer model[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 260: 112428, doi: 10.1016/j.rse.2021.112428.

[20] Yuan Y W, Wang X S, Fang Y, et al. Examination of the quantitative relationship between vegetation canopy height and LAI[J]. Advances in Meteorology, 2013, 2013(3): 1-6.

[21] Gupta R K, Prasad T S, Vijayan D. Estimation of roughness length and sensible heat flux from WiFS and NOAA AVHRR data[J]. Advances in Space Research, 2002, 29(1): 33-38.

[22] Xing Q, Wu B F, Yan N N, et al. Evaluating the relationship between field aerodynamic roughness and the MODIS BRDF, NDVI, and wind speed over grassland[J]. Atmosphere, 2017, 8(1): 1-11.

[23] Hammond D S, Chapman L, Thornes J E. Roughness length estimation along road transects using airborne LIDAR data[J]. Meteorological Applications, 2012, 19(4): 420-426.

[24] Li A H, Zhao W G, Mitchell J J, et al. Aerodynamic roughness length estimation with lidar and imaging spectroscopy in a shrub-dominated dryland[J]. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 2017, 83(6): 415-427.

[25] Colin J, Faivre R. Aerodynamic roughness length estimation from very high-resolution imaging LIDAR observations over the Heihe Basin in China[J]. Hydrology Earth System Sciences, 2010, 14 (12): 2661-2669.

[26] Santos C, Lorite I J, Allen R G, et al. Aerodynamic parameterization of the satellite-based energy balance (METRIC) model for ET estimation in rainfed olive orchards of Andalusia, Spain[J]. Water Resources Management, 2012, 26(11): 3267-3283.

[27] Masseroni D, Facchi A, Gandolfi C. Estimation of zero-plane displacement height and aerodynamic roughness length on rice fields [J]. Italian Journal of Agrometeorology, 2015, 20(1): 67-75.

[28] Yang R, Friedl M A. Determination of roughness lengths for momentum and heat over boreal forests[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2003, 107(3): 581-603.

[29] Toure A A, Rajot J L, Garba Z, et al. Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel[J]. Catena, 2011, 85(3): 205-214.

[30] 邢丽玮. 基于MODIS和GLAS数据反演多时序中国陆表植被空气动力学粗糙度[D]. 北京: 首都师范大学, 2012. [Xing Liwei. Retrieval of aerodynamic roughness of land surface vegetation in China with multiple time series based on MODIS and GLAS data [D]. Beijing: Capital Normal University, 2012.]

[31] 周艳莲, 孙晓敏, 朱治林, 等. 几种典型地表粗糙度计算方法的比较研究[J]. 地理研究, 2007, 26(5): 887-896. [Zhou Yanlian, Sun Xiaomin, Zhu Zhilin, et al. Comparative research on four typicalcc surface roughness length calculation methods[J]. Geographical Research, 2007, 26(5): 887-896.]

[32] Yu M Z, Wu B F, Zeng H W, et al. The impacts of vegetation and meteorological factors on aerodynamic roughness length at different time scales[J]. Atmosphere, 2018, 9(4): 149, doi: 10.3390/atmos9040149.

[33] Zhang C L, Yuan Y X, Zou X Y, et al. A comparison of the aerodynamic characteristics of four kinds of land surface in wind erosion areas of northern China[J]. Catena, 2022, 212: 106112, doi: 10.1016/j.catena.2022.106112.

[34] Yu M Z, Wu B F, Yan N N, et al. A method for estimating the aerodynamic roughness length with NDVI and BRDF signatures using multi-temporal Proba-V data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(1): 6, doi: 10.3390/rs9010006.

[35] 卢俐, 刘绍民, 孙敏章, 等. 大孔径闪烁仪研究区域地表通量的进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(9): 932-939. [Lu Li, Liu Shaomin, Sun Minzhang, et al. Advances in the study of areal surface flux with large aperture scintillometer[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(9): 932-939.]

[36] 赵永来, 麻硕士, 陈智. 植被覆盖地表的空气动力学粗糙度及对土壤风蚀的影响[J]. 农机化研究, 2007(2): 36-39. [Zhao Yonglai, Ma Shuoshi, Chen Zhi. Aerodynamic roughness of vegetation coverage surface and its influence on soil erosion by the wind tunnel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(2): 36-39.]

[37] 王佳庭, 于明含, 杨海龙, 等. 乌兰布和沙漠典型植物群落土壤风蚀可蚀性研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1543-1550. [Wang Jiating, Yu Minghan, Yang Hailong, et al. Soil erosibility of typical plant communities in Ulan Buh Desert[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1543-1550.]

[38] 刘艳萍, 刘铁军, 蒙仲举. 草原区植被对土壤风蚀影响的风洞模拟试验研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 668-672. [Liu Yanping, Liu Tiejun, Meng Zhongju. Wind tunnel simulation test on the influence factors of wind erosion in grassland areas[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(3): 668-672.]

[39] Minvielle F, Marticorena B, Gillette D A, et al. Relationship between the aerodynamic roughness length and the roughness density in cases of low roughness density[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2003, 3(3): 249-267.

[40] Lu L, Liu S, Xu Z, et al. The characteristics and parameterization of aerodynamic roughness length over heterogeneous surfaces[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(1): 180-190.

[41] Maurer K D, Hardiman B S, Vogel C S, et al. Canopy-structure effects on surface roughness parameters: Observations in a great lakes mixed-deciduous forest[J]. Agricultural Forest Meteorology, 2013, 177: 24-34.

[42] Abbas M R, Hason M M, Ahmad B B, et al. Surface roughness distribution map for Iraq using satellite data and GIS techniques[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(17): 839, doi: 10.1007/s12517-020-05802-z.

[43] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL)[J]. Journal of Hydrology, 1998, 212-213: 198-212.

[44] Fang H, Baret F, Plummer S, et al. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications[J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57: 739-799.

[45] Schaudt K J, Dickinson R E. An approach to deriving roughness length and zero-plane displacement height from satellite data, prototyped with BOREAS data[J]. Agricultural Forest Meteorology, 2000, 104(2): 143-155.

[46] Alekseychik P K, Korrensalo A, Mammarella I, et al. Relationship between aerodynamic roughness length and bulk sedge leaf area index in a mixed-species boreal mire complex[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(11): 5836-5843.

[47] Cho J, Miyazaki S, Yeh J F, et al. Testing the hypothesis on the relationship between aerodynamic roughness length and albedo using vegetation structure parameters[J]. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(2): 411-418.

[48] 杨阿强, 孙国清, 卢立新, 等. 基于MODIS资料的中国东部时间序列空气动力学粗糙度和零平面位移高度估算[J]. 气象科学, 2011, 31(4): 516-524. [Yang Aqiang, Sun Guoqing, Lu Lixin, et al. Deriving aerodynamic roughness length and zero-plane displacement height from MODIS product for eastern China[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2011, 31(4): 516-524.]

[49] Jasinski M F, Crago R D. Estimation of vegetation aerodynamic roughness of natural regions using frontal area density determined from satellite imagery[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 94(1): 65-77.

[50] Xing Q, Wu B F, Yan N N, et al. Sensitivity of BRDF, NDVI and wind speed to the aerodynamic roughness length over sparse Tamarix in the downstream Heihe River Basin[J]. Remote Sensing, 2018, 10(1): 56, doi: 10.3390/rs10010056.

[51] Paul-Limoges E, Christen A, Coops N C, et al. Estimation of aerodynamic roughness of a harvested douglas-fir forest using airborne LIDAR[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 136: 225-233.

[52] Greeley R, Lancaster N, Sullivan, et al. A relationship between radar backscatter and aerodynamic roughness: Preliminary results [J]. Geophysical Research Letters, 1988, 15(6): 565-568.

[53] Tian X, Li Z Y, Van der Tol C, et al. Estimating zero-plane displacement height and aerodynamic roughness length using synthesis of LiDAR and SPOT-5 data[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(9): 2330-2341.

[54] Ferhat Bingöl. A simplified method on estimation of forest roughness by use of aerial LIDAR data[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(6): 3274-3282.

[55] Streutker D R, Glenn N F. LiDAR measurement of sagebrush steppe vegetation heights[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(1-2): 135-145.

[56] Trepekli K, Friborg T. Deriving aerodynamic roughness length at ultra-high resolution in agricultural areas using UAV-Borne LiDAR[J]. Remote Sensing, 2021, 13(17): 3538, doi: 10.3390/rs13173538.

[57] 吴炳方, 熊隽, 闫娜娜, 等. 基于遥感的区域蒸散量监测方法——ETWatch[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 671-678. [Wu Bingfang, Xiong Jun, Yan Nana, et al. ETWatch for monitoring regional evapotranspiration with remote sensing[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 671-678.]

[58] Meier R, Davin E L, Bonan G B, et al. Impacts of a revised surface roughness parameterization in the community land model 5.1[J]. Copernicus GmbH, 2021, 15(6): 2365-2393.

[59] 张雅静, 申向东. 植被覆盖地表空气动力学粗糙度与零平面位移高度的模拟分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 21-26. [Zhang Yajing, Shen Xiangdong. Simulation analysis of vegetation covered surface's aerodynamics roughness length and zero displacement[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(1): 21-26.]

[60] 周艳莲, 孙晓敏, 朱治林, 等. 几种不同下垫面地表粗糙度动态变化及其对通量机理模型模拟的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(增刊1): 244-254. [Zhou Yanlian, Sun Xiaomin, Zhu Zhilin, et al. Dynamic variation of surface roughness on several different underlying surfaces and its influence on flux mechanism model simulation[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2006, 36(Suppl.1): 244-254.]

[61] Li J, Okin G S, Herrick J E, et al. Evaluation of a new model of aeolian transport in the presence of vegetation[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2013, 118(1): 288-306.

[62] Nakai T, Sumida A, Daikoku K, et al. Parameterisation of aerodynamic roughness over boreal, cool-and warm-temperate forests[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(12): 1916-1925.

[63] 崔珂军, 李生宇, 范敬龙, 等. 蒙古国中部草原地区风蚀沙漠化的风沙活动特征——以乔伊尔市为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 792-801. [Cui Kejun, Li Shengyu, Fan Jinglong. Aeolian sand activity characteristics of wind erosion and desertification in the grassland area of central Mongolia: A case of Choir City[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 792-801.]

[64] Basu S, Chakraborty P K, Nath R. Aerodynamic properties of green gram sown in different environments in Indo-Gangetic plains of west Bengal[J]. Journal of Agrometeorology, 2018, 20(2): 122-125.

[65] 刘啸然, 李茂善, 胡文斌. 藏北高原那曲地区不同下垫面地表粗

糙度的变化特征研究[J]. 高原气象, 2019, 38(2): 428–438. [Liu Xiaoran, Li Maoshan, Hu Wenbin. Variations of surface roughness on different underlying surface at Nagqu Area over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(2): 428–438.]

[66] Zeng Z, Piao S, Li L Z X, et al. Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(6): 432–436.

[67] 谭锦, 吴秀芹, 阮永健, 等. 油莎豆(*Cyperus esculentus*)耕作区作物残茬对农田风蚀的影响[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 546–556. [Tan Jin, Wu Xiuqin, Ruan Yongjian. Effects of crop residues on farmland wind erosion in *Cyperus esculentus* planting area[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 546–556.]

Research progress on aerodynamic roughness

LI Xinyu, WANG Jingpu, WANG Zhoulong

(School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China)

Abstract: Aerodynamic roughness is defined as the height at which the wind speed becomes zero under neutral and stable conditions. It is an important parameter for measuring the momentum and energy exchange between the underlying surface and atmosphere, and it is critical for investigating various surface processes and climate change. However, it has always been difficult to estimate aerodynamic roughness accurately at the regional scale, and there is no unified estimation model presently. Therefore, the parameterization of aerodynamic roughness is a topic worthy of further study. As a long-range monitoring method, remote sensing technology has the advantages of macroscopic and rapid acquisition of ground feature information, and its ability to achieve dynamic monitoring at the regional scale or a larger scale in estimating the aerodynamic roughness of vegetation-covered surfaces. Therefore, using remote sensing technology to estimate aerodynamic roughness has become a hot issue at home and abroad in recent years. In this study, the progress of research on aerodynamic roughness at home and abroad in recent years is systematically described. The estimation methods are divided into two categories: one is based on measured data, and the other is the remote sensing method, which is rapidly advancing. This study primarily introduces the method of estimating the aerodynamic roughness of the underlying surface of vegetation by remote sensing technology. Methods based on measured data include the canopy height fixed ratio method, field experiment method, and wind tunnel method; remote sensing methods include vegetation index, LIDAR, and multi-source remote sensing synergistic methods. In addition, the advantages and disadvantages of the different methods are summarized at the end of each section. Finally, this study analyses the influence of meteorological factors and morphological characteristics of surface roughness elements on aerodynamic roughness and discusses the development trends and problems of remote sensing techniques in estimating aerodynamic roughness, aiming to provide ideas for subsequent research on remote sensing monitoring of aerodynamic roughness.

Key words: aerodynamic roughness; remote sensing; research status; influencing factors